

레이저 가공 및 광계측의 산업적 활용

김철중
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

레이저용융중 산업적으로 가장 활발한 분야는 레이저 가공과 광계측이다. 레이저 가공과 관련하여 광섬유 전송 특성으로 각광 받고 있는 Nd:YAG 레이저의 산업적 활용에 대하여 논하며 특히, 최근에 개발된 kW 급 Nd:YAG 레이저의 산업적활용면에서 괄목할 만한 성과를 이룬 원자력분야에서의 보수용접과 관련 용접장치 개발 및 용접특성 연구에 대하여 기술하며 산업분야에서 중요한 알루미늄의 레이저용접 추세 및 전망에 대하여 기술하였다. 또한, 광계측중 산업적으로 가장 활발히 활용되는 삼각측량과 간섭계를 이용한 비파괴검사에 대하여 적용사례 중심으로 논의하였다.

I. kW Nd:YAG 레이저의 산업적 활용

레이저를 이용한 가공이 산업적인 레이저 활용의 시작이라고 할 수 있으며 레이저 가공에는 대표적으로 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저가 '70년대 부터 이용되어 왔다. CO₂ 레이저는 '80년대에 들어 수 kW 급의 대형 레이저가 산업적으로 보편화 되었으나 Nd:YAG 레이저는 평균출력이 CO₂에 미치지 못해 산업적 활용에서 많은 제한을 받아 왔다.

그러나, '80년대 후반 이후 kW 급의 Nd:YAG 레이저가 상품화 되면서 광섬유 전송 특성을 살려서 원자력분야 등에서 활용되어 산업적으로 각광을 받게 되었다. 현재 kW 급의 Nd:YAG 레이저를 생산하는 회사는 Lumonics, Rofin-Sinar, Quantel, NEC, 도시바 등 10여개 회사에 달하며 출력 형태도 펄스형, 변조 연속발진형 등 다양해서 자동차, 선박 등의 중공업 분야에의 적용까지도 기대되고 있다. 최근에는 단일 장치로 3 kW의 출력을 내는 Nd:YAG 레이저가 독일 HAAS, 일본 IHI, 미국 Hobart 등에서 상품화 되었으며 400 um의 광섬유로 이런 출력을 전송할 수 있게 되었다. 또한, 여러개의 레이저 출력을 합성하여 5-6 kW의 출력을 내는 것도 일본의 AMPI 와 독일의 고체레이저 연구소에서 진행되고 있다.

이와같은 kW 급 Nd:YAG 레이저의 산업적 활용

에서 가장 기대되는 것은 AI의 용접이다. 그동안 선박이나 자동차에 사용되던 FRP의 폐기물 처리상의 문제점이 제기되며 이를 대체할 수 있는 AI의 레이저 용접이 지난 수년간 활발히 연구되고 있다. 그 밖에도, 광섬유 전송 특성을 살려서 CO₂ 레이저로 적용하는 데 전송상에 어려움이 있던 분야에서의 활용도 기대되고 있다. 그림.1은 AMPI에서 개발 중인 5.5 kW Nd:YAG 레이저 용사장치의 구성도이다.

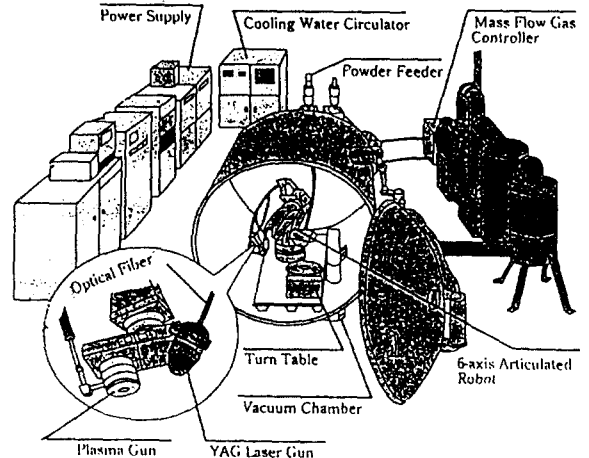


그림.1 5.5 kW Nd:YAG 레이저 용사장치

II. 원자력분야의 kW Nd:YAG 활용

원자력분야는 접근이 제한되는 환경에서의 작업에서의 안전성을 향상시키기 위해 레이저 발명 이후 처음부터 레이저의 원격 전송 특성을 살린 레이저 가공 연구가 진행되었다. 특히, 초기의 대출력 CO₂ 레이저 중 상당수가 원자력에의 적용을 목표로 개발되었으며 산업적 상품화의 근간이 되었다.

그동안, 핵연료 절단, 핵연료 부품 용접, 핵연료 피복관 열처리, 핵연료 피복관 marking 등의 다양한 분야에서 레이저 가공이 이용되었지만 산업적 측면에서 가장 성공적이라고 할 수 있는 것은 원자력 발전소 증기발생기 전열관의 레이저 보수용접이다. 그림.2의 개념도에서와 같이 원자력발전소의 수명을 좌우하며 유지보수상에 관건이 되는 증기발생기 전열관의 sleeve 보수 용접에 광섬유로 전송된 Nd:YAG 레이저를 이용하여 20 mm 보다 작은 전열관 내부에서 용접을 수행하는 것이다.

이 기술은 '80년대 후반부터 일본 MHI, 불란서 Framatome, 미국 WH 및 독일 Siemens 등에서 개발에 착수하여 '90년대 초반 이후 원자력발전소에서 적용되어 원자력발전소의 안전성 향상에 크게 기여하였다. 앞에서 언급한 것과 같이 이 시기가 kW 급 Nd:YAG 레이저가 개발된 시기로서 kW 급 레이저의 상품화를 가속시켰으며 산업적 활용의 효시라고도 할 수 있다. 일본의 경우 MHI는 그동안 10여대의 1 - 2 kW 급 Nd:YAG 레이저를 구입하여 일본에서의 kW 급 Nd:YAG 레이저 상품화에 크게 기여하였다. 앞으로도 원자력분야에서 kW 급 Nd:YAG 레이저는 원격 절단을 이용한 해체, 유지 보수 등에서의 지속적인 활용이 기대되고 있다.

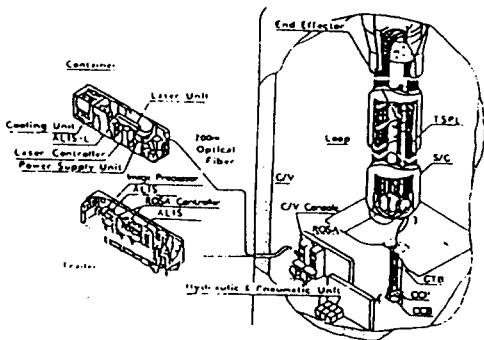


그림. 2 전열관 레이저 보수용접 개념도

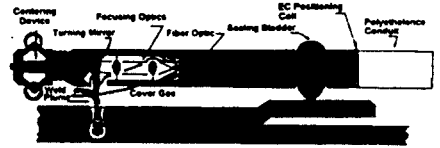


그림. 3 전열관 내부용접용 용접장치

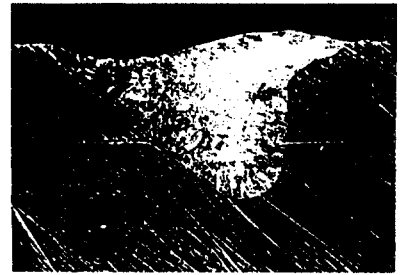


사진.1 전열관 내부용접 단면사진

그림.3은 전열관 내부 용접을 위한 용접장치의 구성도이며 사진.1은 실제로 용접된 sleeve와 전열관의 단면사진이다. 용접시에 spatter가 튀는 것을 방지하기 위하여 레이저 집속 각도를 수직에서 20도 경사지게 하였다. 내부용접은 용접장치의 소형 모터를 회전시켜 구리반사거울을 같이 회전시키면서 소형렌즈에 의해 집속된 레이저가 내부 표면에 회전되면서 집속되게 하였다.

III. 삼각측량 광계측의 산업적 활용

삼각측량을 이용한 광계측은 가장보편적으로 산업현장에서 적용되는 기술이다. 그러나, 실제 사용시에 오류를 범하기가 쉽기때문에 이에 대한 검토가 필요하다. 상품화되어 있는 모델도 수십가지 이상이며 용도에 적절한 측정 범위와 측정 정밀도에 맞추어 시스템을 설계하여야 한다. 설계시에 고려할 사항은 필요한 작업거리, 측정거리의 정밀도, 측정코자하는 거리의 범위이다.

그림. 4는 삼각측량의 개념도이다. 이때 detector가 놓이는 축 z'을 거리를 측정하는 z축에 대해 렌즈의 변환조건을 만족시켜야 한다. 즉, 렌즈축상에 서로 대응되는 P₁과 P'₁을 통과하는 z축

과 z' 축은 렌즈의 수직선상에서 U_0 에서 서로 만나게 z' 축을 조정해야 한다. 이렇게 배치해야 수차 없는 렌즈에 의해 P_2 는 P_2' 에 맺히게 된다.

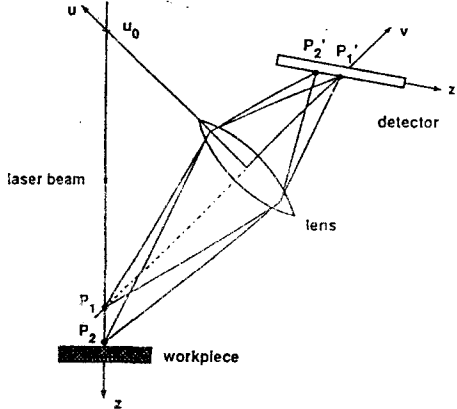


그림. 4 삼각측량의 개념도

또한, 측정가능 거리의 범위는 집속되는 빔의 단면적이 2 배되는 Rayleigh 길이의 2 배까지가 적정하다. 이 측정 범위는 He-Ne 의 경우 촛점의 직경이 200 μm 이면 100 mm 이상이나 되며 측정 범위가 25 mm 정도이면 촛점의 직경을 100 μm 까지 줄여도 된다. 즉, 측정 범위는 촛점의 직경의 제곱에 비례한다. 거리 측정의 정밀도는 집속되는 촛점의 직경에 비례하며 레이저와 렌즈의 축이 이루는 각도의 \tan 값에 역비례한다. 따라서, 45 도의 경우 측정 거리의 정밀도는 집속되는 촛점의 직경과 같다. 측정 거리의 범위와 측정 정밀도를 동시에 만족하기 위해서는 detector 의 크기가 맞아야 하며 detector 소자의 수도 필요한 정밀도를 달성하기에 충분해야 한다. 측정 가능 범위 및 거리 정밀도의 근간은 결국 촛점의 직경에 좌우되며 정밀한 측정을 위해서는 촛점의 직경을 작게해야 한다. 이와같은 삼각측량의 경우 촛점의 직경을 수 μm 까지 할 수 있으며 정밀도는 1 μm 이하까지도 가능하다.

최근에는 이와같은 삼각측량 기술을 이용하여 pipe 내부의 결함이나 pipe 의 진원도를 측정하는 장치도 개발되었다. 약 10 mm 직경의 pipe 내부에서 100 μm 직경의 diode 레이저 촛점으로 25 μm 의 측정 정밀도로 반경의 원주에 따른 변화를 측정할 수 있다.

IV. ESPI를 이용한 비파괴 검사

1) 압력용기 내부의 결함 검출

원자력발전소의 보편적인 구조물인 배관이나 압

력용기등의 결함검사는 발전소 점검의 많은 부분을 차지하고 있다. 현재 많이 사용되는 비파괴결합검사 방법으로는 초음파검사, x선 검사, 와전류탐상법등이 있으나 이러한 방법들은 검사하는 대상과 접촉하거나 가까운 위치에서 검사가 진행되며 결합 측정부위가 한정되어 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 이에 비해 홀로그래피 또는 ESPI에 의한 결합검사 방법은 원격검사가 가능하고, 레이저가 조사되는 부위의 검사가 한번에 가능하며, 결합 뿐 아니라 결함에 가해지고 있는 응력분포에 대한 정보도 알 수 있다는 장점을 가지고 있어 많은 실용화 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 간섭계를 사용하는 파이프의 결합검출 예에 대하여 기술하고자 한다.

간섭계에 의한 결합검사는 대상에 stress를 가할 때 인가되는 미소변형을 측정하여, 전체 변형과 결함이 있는 부위의 변형의 차이로 결함을 검출해낸다. 이 방법은 간섭계의 측정 분해능이 sub-micro meter 의 order 의 정밀도를 가짐으로 가능하다.

그림.5 은 steel tube 내벽에 있는 인공결함을, 외부에서 측정하기 위한 스펙클 간섭계 실험장치이다. 그림에서 압력용기에 압력을 인가할 때의 변형을 홀로그래피 간섭계나 ESPI를 사용하여 측정하면 결함부위의 변형이 다른 부위와 다르게 나타나는데, 이것으로부터 내부의 결함을 알 수 있다. 간섭무늬의 정량적인 처리를 위하여 PZT 에 의한 위상 이동 방법과 영상처리보드 및 computer를 사용하였다.

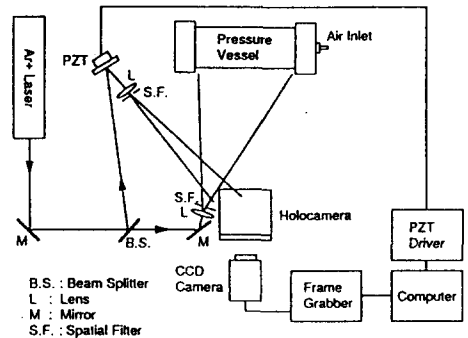
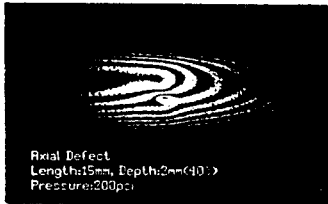


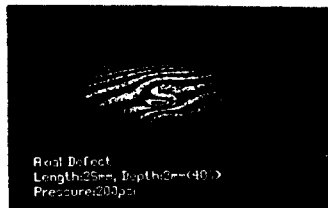
그림.5 간섭계 장치구성도

실험에 사용한 결함샘플은 두께 5mm, 외경 100mm, 길이 300mm 의 steel tube 이고, 내부압력은 200 PSI이며, 내부의 결함은 방전가공으로 인공적으로 만들었다. 결함의 차원은 ASME code 에 의하면 길이, 방향, 두께에 대한 깊이의 비로써 정의되는데, 본 실험에서의 샘플은 축방향의 결함으로 폭은 1mm 이며, 깊이는 2mm, 길이는 15mm 와 25mm이다.

사진.2 는 결함이 있는 tube 의 압력변형을 측정 한 실험결과이다. 시편 전체에 걸쳐 전반적인 변형이 인가되나, 결함이 있는 부위에서는 간섭무늬의 이상이 있음을 알 수 있다. 간섭무늬의 좌우의 비대칭은 압력을 인가하는 과정에서 시편 이동에 의한 것이다.



(a) sample 1 : 결함길이 = 15mm



(a) sample 2 : 결함길이 = 25mm

사진. 2 결함 압력용기의 간섭무늬

사진. 3 은 시편 1 의 압력변형에 위상이동 방법을 적용하여 측정 한 변위의 위상도로 위상기울기 및 양으로써 변위를 정량적으로 알 수 있다. 이 위상도를 펼치면 (phase unwrapping), 불연속이 제거된 변위량을 얻는데, 이로부터 미분하여 압력관의 이동 효과를 없애고 결함부위의 국부변형의 효과를 크게 한 것이 사진. 4 이다. 그리고 이결과를 결함검출 자동화에 응용하기 위하여 필터처리후 한번더 미분 처리를 한 것이 사진. 5 이다. 사진에서 결함의 위치를 확실하게 구별할 수 있으며, 한 종류의 시편에 대해 적용할 경우 그 정도를 조정함으로써 결함의 크기에 대한 정보도 알 수 있다.

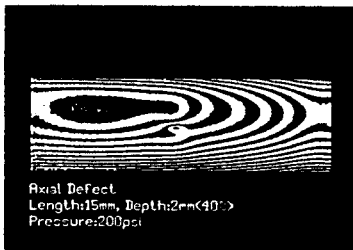


사진 3. 결함 압력용기의 간섭무늬 위상도

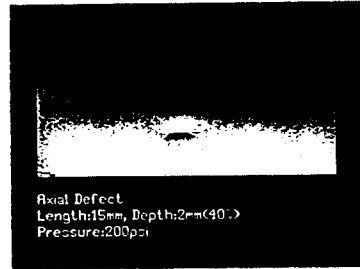


사진. 4 변형량의 1 차 미분결과



사진. 5 변형량의 2 차 미분결과

2) 레이저여기 변형에 의한 결함 검출

ESPI 를 이용한 비파괴 검사는 외부 영양에 의한 변형으로 부터 내부 결함을 찾을 수가 있다. 그러나, 국부적인 결함을 찾기 위해서는 국부적으로 매우 큰 strain 을 유발시키는 변형을 가할 필요가 있다. 따라서, 펄스형 레이저에 의해 순간적이며 국부으로 여기되는 변형을 ESPI 를 이용하여 측정하여 금속판의 결함을 찾는 실험을 수행하였으며 전체 장치의 구성은 그림.6 과 같다.

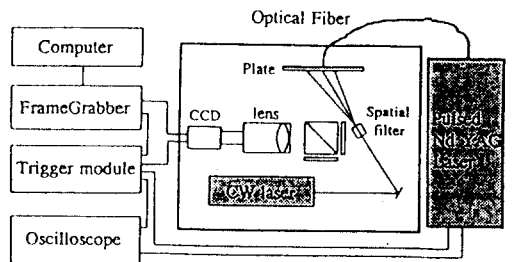


그림.6 금속판 결함 검출 장치 구성도

산업 현장분위기에서도 사용할 수 있는 shearing ESPI 를 사용하였으며 영상렌즈를 조정하여 금속판의 8x6 mm 를 CCD 카메라로 볼 수 있게 하였다. 또한, Trigger Module 이 펄스 레이저와 frame grabber 및 CCD 카메라를 동기시키도록 하였다.

간섭무늬의 선명도는 카메라의 shutter 속도에 좌우되나 1/250 초 이상에서 선명한 간섭무늬를 얻을 수 있었다. 다만, 상용 CCD 카메라의 1 frame 은 2 개의 field 로 구성되어 있고 각 filed 간격이 16 msec 이어서 시간적인 변형의 변화가 적어도 16 msec 동안 적은 곳에서만 깜빡이지 않는 간섭무늬를 볼 수 있으며 16 msec 동안 변화가 큰 곳에서는 2 개의 field 가 서로 다르기 때문에 깜빡이는 간섭무늬가 나타난다. 사진.6 은 4 mm Al 판을 20 J 의 Nd:YAG 레이저로 조사한후 변형의 peak에서 얻은 간섭무늬이다. 변형의 시간적 변화를 변위측정기로 측정한 결과는 그림.7 과 같다.

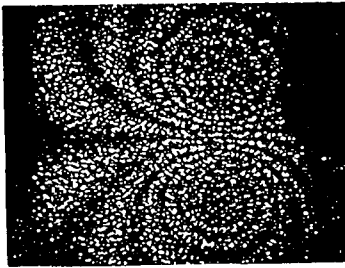


사진.6 레이저에 의해 여기된 Al 판의 국부 변형

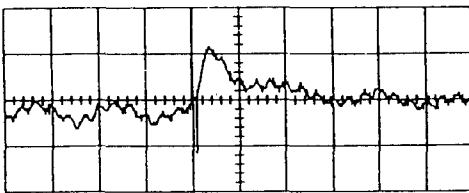


그림.7 변형의 시간적 변화 (Div/50 msec)

위와같은 국부적인 순간변형의 측정기술을 이용하여 금속판의 결함 검출을 시도하였다. 4 mm Al 판에 깊이 1.5 mm, 폭 1 mm 되게 파내어 결함을 만들고 결함 옆에 레이저를 조사시켜 변형을 측정하였다. 사진.7 에서와 같이 변형이 가장 큰 레이저 조사후 20 msec 에서는 사진의 아래측 결함 부위에서 간섭무늬의 불연속을 볼 수 있으나 변형이 거의 없

어지는 레이저 조사후 120 msec 에는 간섭무늬의 불연속을 볼 수 없으며 전체적인 변형이 레이저 조사부인 사진의 가운데에서 아래 위로 대칭인 형태를 유지하고 있다.

즉, 레이저 여기에 의한 국부적인 순간변형을 측정하여 내부 결함을 검출 할 수 있었다. 그러나, 변형 측정이 레이저 조사후 빠른 시간내에 이루어 저야만 결함을 검출 할 수 있으며 시간이 지나면 결함에 의한 변형 차이를 볼 수가 없었다. Stainless 의 경우는 Al 보다 시간적인 변화가 거의 10 배 정도 느리며 이는 열전달상수의 크기 차이와 거의 비슷하다.

이런 현상은 결함부위의 자연진동수가 결함 없는 부위보다 느려서 결함있는 부위는 변형이 천천히 여기되는 데 기인한 것으로 판단되며 이에 대한 실험을 계속할 계획이다.

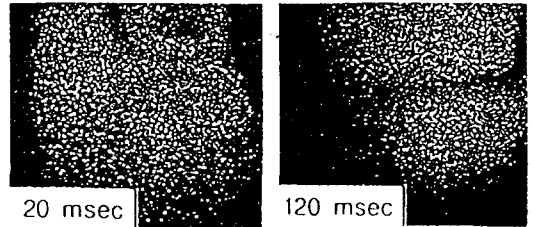


사진.7 결함있는 Al 판의 국부 변형

V. 간섭계 이용 진동 검사

실험적으로 진동을 측정하는 방법으로는 압전소자인 가속도계를 많이 사용하고 있으며, 최근에는 비접촉 측정장치인 레이저 도플러 진동측정장치등도 많이 도입되고 있다. 그러나 이들 측정장치들이 한 point 의 진동을 측정할 수 있는 것에 비해 홀로그래피/스펙클 간섭계 방식은 레이저가 조사되는 면 전체의 동시 측정이 가능하여 전체의 진동분포 및 위상을 알 수 있는 장점이 있다.

간섭계를 이용하는 진동측정은 여러가지 방법이 있지만, 이중펄스 레이저에 의한 이중노출 방식과 CW 레이저에 의한 시간평균 방식의 2 가지가 주로 사용된다. 펄스 홀로그래피 방법은 불규칙적인 진동(여러 주파수가 섞여 있거나, 진동의 위상이 수시로 바뀌는 경우)의 측정에 많이 사용되며, CW 레이저에 의한 방법은 규칙적인 진동해석(vibration modal analysis)에 많이 활용된다. 본 논문에서는 이 두가지 방식의 장치 및 응용예에 대해 기술하고자 한다.

1) Pulse Holography 간섭계

진동을 측정하기 위한 이중 펄스 홀로그래피 간섭계는 그림. 8 과 같이 구성되었다. 레이저 광원으로는 이중펄스 발진이 가능한 10 J 급 펄스형 루비 레이저가 사용되었다. 단일모드의 발진을 위해 2개의 etalon과 spatial filter 가 내장되어 있으며, 가간섭거리는 1m 이상이다. 장치안에는 측정결과의 정량화를 위한 이중 기준빔 module 이 내장되어 있어, 재생과정에서 위상이동 방법을 적용할 수 있다. 진동하고 있는 물체의 진동 측정 순간을 정확히 결정하기 위하여 point 진동감시 device와 trigger 장치가 레이저 controller, shutter, Pockel cell driver 등과 연결되어 사용된다.

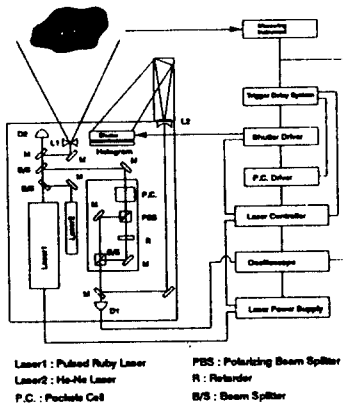


그림. 8 펄스 홀로그래피 간섭계 구성도

사진. 8 은 자동차 판넬의 진동을 펄스 홀로그래피 방법으로 측정하여, 정량적인 계산을 한 결과이며, 사진. 9 는 판재에 충격을 가하였을 경우의 순간적인 변형 및 충격파의 전파를 펄스 홀로그래피 방법으로 측정한 실험 결과이다. 사진에서 진동분포와 각 부위에 따른 진동위상을 알 수 있다.

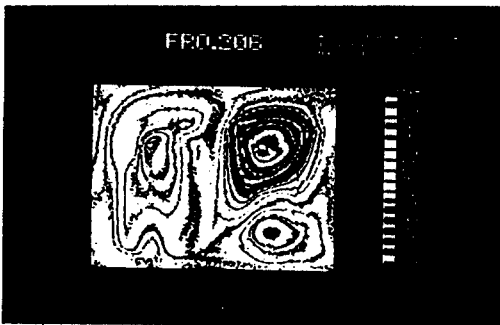


사진. 8 자동차 판넬의 진동분포 측정결과

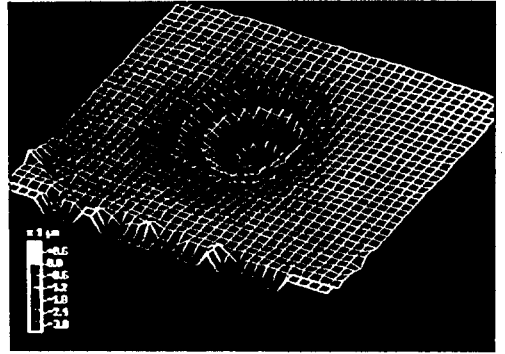


사진. 9 판재의 충격에 의한 순간변형

2) ESPI 간섭계

ESPI 장치는 사용이 간편하다는 장점으로 변형 측정과 진동측정 분야에서 계속적으로 사용이 늘어나고 있다. ESPI 에 의한 진동측정의 경우 시간평균 방법, 위상변조 방법, stroboscopic 방법등이 사용되고 있는데, 규칙적인 진동 분포를 측정하는 분야, 즉 특정 주파수에서의 modal analysis 에 많이 사용된다. 시간평균 방법은 실험이 간단하다는 장점으로 공진모드에서의 모드가시화등에 많이 사용되나 정량화가 어렵다는 단점이 있으며, 기술한 나머지 두 방법은 정량화가 가능한 방법이다.

그림. 9 는 진동 모드 측정을 위한 stroboscopic ESPI 장치 구성도이다. ESPI 구성은 변형측정을 위한 일반 ESPI 장치와 동일한 구성을 가진다. 구성도에서 stroboscopic 장치 부분을 제외하면 일반 시간평균 측정 장치와 동일하게 되며, stroboscope 기능의 AO modulator 대신 기준빔의 위상을 변조시키는 별도의 PZT 나 EO modulator 를 사용하면 위상 변조 ESPI 장치가 된다.

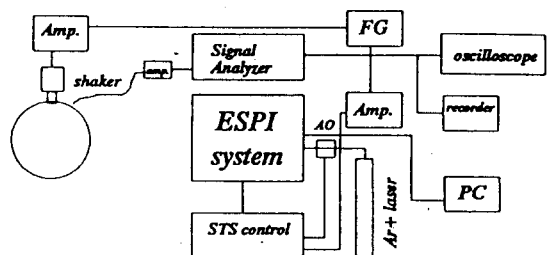


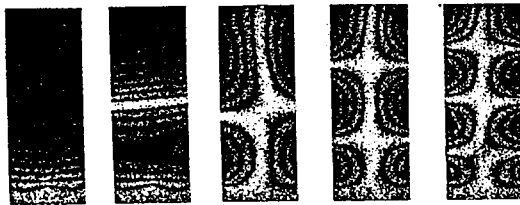
그림. 9 진동측정 ESPI 장치구성도

사진. 10 은 개발된 위상변조 ESPI 장치로 측정 한 cantilever 판넬의 진동모드이다.



사진.10 ESPI 로 측정한 판넬의 진동모드

일반적인 ESPI 장치가 주변진동의 영향을 많이 받아 실제 산업적인 사용에 많은 어려움이 있는데 비하여, shearing ESPI 장치는 주변진동의 감도가 작아 나쁜 환경에서의 사용에 장점이 있다. 실제로 구성된 shearing ESPI 장치의 경우 카메라 삼각대 위에 head module 을 구성하여도 측정시 문제가 없었다. 이 shearing ESPI 로 측정된 결과는 진폭의 미분형태로 나타나며, 따라서 strain 을 구할 때 유용하나 진폭을 구하기 위해서는 적절한 적분계산과정을 거쳐야 한다. 사진. 11 은 개발된 shearing ESPI 장치로 측정된 cantilever 의 진동모드 기울기 간섭무늬이고, 그림. 10 은 계산된 진폭 분포이다.



F = 58 Hz F = 326 Hz F = 747 Hz F = 1412 Hz F = 2387 Hz

사진. 11 Cantiliver 의 진동모드 기울기분포 예

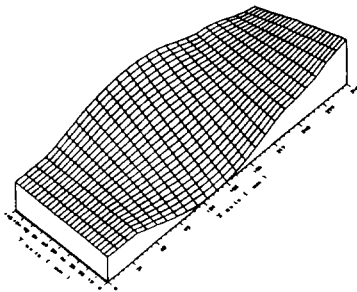
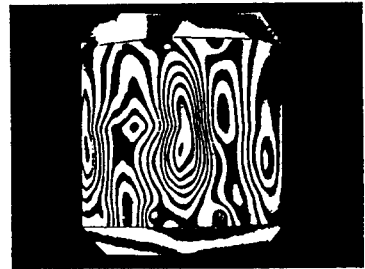


그림. 10 Cantiliver 진동모드의 3차원 진폭분포

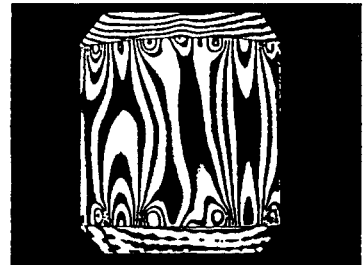
VI. 가전제품의 광계측 검사 활용

개발된 홀로그래피, ESPI 장치 및 측정기술을 가전제품의 검사 및 개선에 활용하였다. 주 응용분야는 하중에 의한 미세변형 측정 및 장치 가동중의 진동분포 측정이다. 이 논문에서는 그중 하중을 받고 있는 세탁기 세탁조의 종류에 따른 변형량 측정, 냉장고의 시간에 따른 변형상태 측정, 그리고 펄스 홀로그래피를 이용한 보일러 진동측정 및 damper 에 의한 진동량 감쇄 예를 기술하였다.

사진. 12 는 두 종류의 세탁조의 시간에 따른 하중 변형을 측정된 간섭무늬 위상도이다. 하중은 세탁조 내부의 물의 양으로 조절하였으며, 실시간 측정 방식을 사용하여 하중량과 시간에 따라 실시간으로 진행되는 변형을 측정하였다. Sample 1 의 경우 1 piece 로 제작된 세탁조로 중심부에 대부분의 변형이 몰리고 있으나, sample 2 의 경우 중심부와 위/아래 부분의 연결 리벳 부분에 많은 변형이 인가됨을 볼 수 있다.



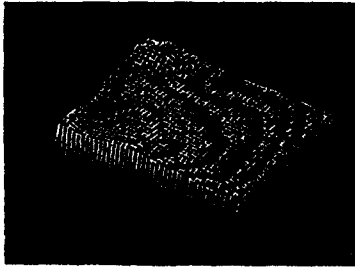
(a) sample 1



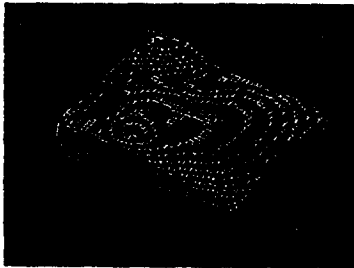
(b) sample 2

사진. 12 세탁조의 하중변형 측정결과

사진. 13 은 시간이 지남에 따라 변형되고 있는 냉장고 옆면의 변형을 측정하여 계산한 결과이다. 사진에서의 좌상 부분이 냉장고 콤프레셔 부분으로 냉장고 frame 이 이 부분에서 생략되어 많은 변형을 일어남을 보여준다.



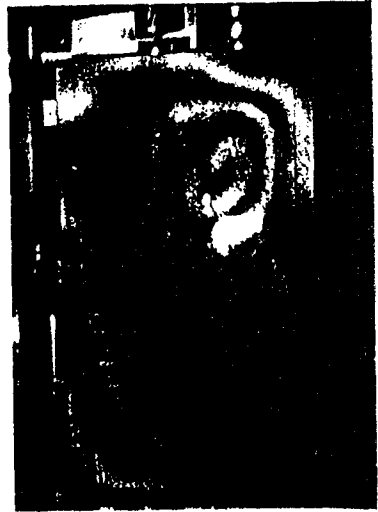
(a) $t = 1$ minute



(b) $t = 5$ minute

사진. 13 냉장고 옆면의 시간에 따른 변형

사진. 14 는 운전중인 가스보일러의 진동을 이중펄스 홀로그래피 방법으로 측정된 것이다. 사진 (a) 는 아무 제한이 없었을 때의 진동을 측정된 것이고, 사진 (b) 는 판넬 부분에 진동감쇄 damper 를 붙인 후 같은 조건에서 촬영한 펄스 홀로그램 결과이다. 사진에서 진동 감쇄를 명확히 볼 수 있다.



(b) with damper

사진. 14 보일러의 진동 측정

VII. 결 론

레이저 가공과 광계측은 산업분야에서 가장 활발히 여러분야에서 이용되는 기술이다. 그러나, 레이저 가공과 광계측은 물리, 전자, 기계, 재료 등의 다양한 기술적 배경을 필요로 하고 있어 제한적인 인적 자원으로 현장 적용기술을 개발하는 데 있어 어려움이 많다. 따라서, 서로 다른 전공분야에서 접근하는 사람들 간의 정보교환 및 기술검토가 있어야 만 실질적인 기술 개발을 기대할 수 있다.

아직 우리의 현실은 이와같은 다양한 인적 구성을 갖추고 있지 않으므로 내전공에서만 접근할 것이 아니라 다른 전공영역까지 침범하는 적극적인 연구 자세가 필요하다. 내 전공만을 찾는 안일한 자세로는 현장 적용할 수 있는 기술 수준을 기대할 수는 없다고 판단된다..



(a) without damper